Digital filter for interpolation of discrete signals

Patent Number: DE19842421
Publication date: 1999-12-23
Inventor(s): MENKHOFF ANDREAS (DE)
Applicant(s):: SIEMENS AG (DE)
Requested Patent: ☑ DE19842421
Application DE19981042421 19980916
Priority Number(s): DE19981042421 19980916
IPC Classification: H03H17/02
EC Classification: H03H17/06C
Equivalents:

Abstract

The digital filter has an interpolated signal value (SW) provided as the sum of a given number of weighted sample values, with each weighting factor determined by an interpolation function with a corresponding number of linear sections. The interpolation function may have a succession of linear sections of constant gradient, each extending over a time interval of half the time spacing between the successive sample values which are weighted by the weighting factors.

(19) BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

DEUTSCHES PATENT- UND MARKENAMT

(12) Offenl gungsschrift
(10) DE 198 42 421 A 1

(51) Int. Cl.^{6}:
H 03 H 17/02

(21) Aktenzeichen: 198 42 421.3
(22) Anmeldetag: 16. 9. 98
(43) Offenlegungstag: 23. 12. 99

DE 198 42 421 A 1

Mit Einverständnis des Anmelders offengelegte Anmeldung gemäß § 31 Abs. 2 Ziffer 1 PatG

(71) Anmelder:
Siemens AG, 80333 München, DE

(72) Erfinder:
Menkhoff, Andreas, Dr., 81927 München, DE

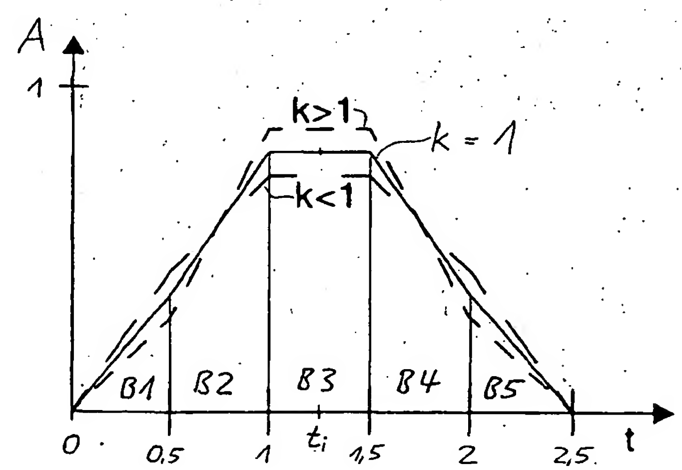
(56) Entgegenhaltungen:
EP 06 96 848 A1
EP 06 95 032 A1
RAMSTAD, T.A.: Digital Methods for Conversion Between Arbitrany Sampling Frequencies, In: IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, June 1984, Vol. ASSP-32 No. 3, S. 577-591;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

(54) Digitale Filterstruktur

(57) Um die Abtastrate um ein beliebiges Verhältnis zu verändern, wird bei einem digitalen Filter zur zeitlichen Interpolation diskreter Signale eine Funktion zur Gewichtung der vorgegebenen Stützwerte benutzt, die abschnittsweise linear definiert ist. Das digitale Filter zeichnet sich durch einen geringen Aufwand, insbesondere bei der Programmierung der Funktion, auf. Die Anmeldungsgebiete liegen bei der Verarbeitung von digitalen Audio- und Videosignalen.



DE 198 42 421 A 1

Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf ein digitales Filter zur zeitlichen Interpolation diskreter Signale. Solche Signale erhält man beispielsweise durch Abtastung analoger Audio- oder Videosignale.

Bei der digitalen Signalverarbeitung werden neben den durch Abtastung gewonnenen Signale häufig zusätzliche Signale benötigt, die das ursprüngliche analoge Signal charakterisieren. Zusätzliche Signale lassen sich aus den Abtastwerten durch Interpolationsverfahren mit Interpolationsfiltern berechnen. Im allgemeinen Fall ermittelt ein Interpolationsfilter aus n Eingangswerten m Ausgangswerte. m kann dabei größer oder auch kleiner als n sein. Ist die Anzahl der Ausgangswerte kleiner als die Anzahl der Eingangswerte, liegt eine Dezimation vor. Bei einer Dezimation um den Faktor 2, also wenn gilt $m = 0{,}5 \cdot n$ wird von den n Eingangswerten nur jeder zweite Wert ausgegeben. Die Ermittlung von Ausgangswerten ist komplizierter, wenn beispielsweise aus fünf Eingangswerten vier Ausgangswerte erzeugt werden sollen. In der Regel sind Ausgangswerte erwünscht, die voneinander jeweils den selben konstanten zeitlichen Abstand aufweisen. Solche äquidistanten Werte erhält man nicht, wenn einfach jeder fünfte Wert nicht an den Ausgang weitergeleitet wird. Vielmehr sind die Zeitpunkte der vier Ausgangswerte gegenüber den Zeitpunkten der fünf Eingangswerte verschoben. Im Gegensatz dazu fallen die Ausgangswerte bei einer Dezimation um einen ganzzahligen Faktor mit den entsprechenden Eingangswerten zusammen.

Ein Verfahren zur beliebigen Änderung von Abtastraten ist in dem Artikel "Digital Methods for Conversion Between Arbitrary Sampling Frequencies" von Tor A. Ramstad in IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. ASSP-32, Nr. 3, Juni 1984, Seiten 577 bis 591 beschrieben. Die zugehörigen Schaltungen werden dort als hybride Systeme bezeichnet. Sie bestehen aus einem digitalen Vorfilter und einem nachgeschalteten analogen Interpolator (Resampler). Aufgrund der großen Zahl arithmetischer Operationen, insbesondere Multiplikationen, ist eine schaltungstechnische Realisierung sehr aufwendig.

Aufgabe der Erfindung ist es daher, ein digitales Filter zur zeitlichen Interpolation diskreter Signale anzugeben, das bei vergleichbaren Interpolationsergebnissen mit einem geringeren Schaltungsaufwand als herkömmliche Filter realisierbar ist. Gelöst wird diese Aufgabe mit einem digitalen Filter mit den Merkmalen des Anspruchs 1.

Die Erfindung hat den Vorteil, daß die Interpolationsfunktion abschnittsweise linear definiert ist. Jeder Abschnitt wird also durch einen einfachen mathematischen Zusammenhang beschrieben.

Die Implementierung der Interpolationsfunktion mit einer Programmiersprache ist besonderes einfach, da die Funktion in Abschnitte unterteilt ist. Die Symmetrie-Eigenschaften der Interpolationsfunktion können in vorteilhafter Weise bei der Programmierung berücksichtigt werden. Einander entsprechender Abschnitte unterscheiden sich nur im Vorzeichen ihrer Steigung.

Mit dem Parameter k lassen sich Breite und Dämpfung der Störbereiche im Amplitudengang des Filters, die aufgrund der Periodizität des Filters beim Übergang einer Periode zur folgenden auftreten, einstellen. Bei Werten für $k < 1$ ist die Dämpfung schwächer und das Filterverhalten breitbandiger als bei $k = 1$.

Die Eigenschaften des digitalen Filters können weiter verbessert werden, wenn seine Impulsantwort mit einer Rechteckfunktion passende hänge gefaltet wird.

Vorzugsweise wird das digitale Filter mit einem linearphasigen Interpolationsfilter kombiniert. Das Interpolationsfilter beispielsweise verdoppelt die Abtastrate und stellt dem digitalen Filter sowohl die ursprünglich vorgegebenen Werte als auch die durch Interpolation gewonnenen Zwischenwerte zur Verfügung. Im digitalen Filter wird dann die Abtastrate um ein beliebiges Verhältnis verändert. Durch geeignete Wahl der Konstanten der Übertragungsfunktion des Interpolationsfilters kann eine optimale Anpassung an das digitale Filter erreicht werden.

Weitere vorteilhafte Aus- und Weiterbildungen sind in Unteransprüchen gekennzeichnet.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand von Figuren näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 die Übertragungsfunktion der Interpolationsfunktion,

Fig. 2 das zeitliche Verhalten der Interpolationsfunktion in bezug auf die Stützwerte,

Fig. 3 eine Filterstruktur mit dem digitalen Filter und

Fig. 4 ein linearphasiges Interpolationsfilter.

Das erfindungsgemäße digitale Filter berechnet aus vorgegebenen Stützwerten, die beispielsweise durch die Abtastung eines analogen Signals bekannt sind, einen Signalwert SW zu einem beliebigen Zeitpunkt zwischen zwei benachbarten Stützwerten so, daß er dem wirklichen Wert des Signals zu diesem Zeitpunkt möglichst gut entspricht. Für diese Interpolation werden Stützwerte verwendet, die sich in zeitlicher Nachbarschaft zu dem zu interpolierenden Signalwert SW befinden.

Jeder der verwendeten Stützwerte wird mit einem Faktor bewertet, der sich aus einer Interpolationsfunktion a(t) ergibt. Bei jedem zu interpolierenden Signalwert SW wird die Interpolationsfunktion a(t) so gewählt, daß sie bezüglich der Zeit zu einem Zeitpunkt t_i, zu dem der Signalwert SW zu berechnen ist, symmetrisch ist. Jeweils zu den Zeitpunkten der Stützwerte läßt sich ein entsprechender Gewichtungsfaktor ermitteln, mit dem der jeweilige Stützwert multipliziert wird. Die Summe der Produkte aus diesen Multiplikationen ergibt den Signalwert SW zu dem Zeitpunkt t_i.

Gemäß **Fig.** 1 ist die Interpolationsfunktion a(t) abschnittsweise linear definiert. Sie weist zwischen 0 und 2,5 Zeiteinheiten fünf Abschnitte B1, B2, B3, B4 und B5 auf. Jeder Abschnitt ist 0,5 Zeiteinheiten lang. Die ersten beiden Abschnitt B1, B2 sind monoton steigend, die beiden letzten Abschnitte B4, B5 sind monoton fallend. Über dem Abschnitt B3 ist die Funktion konstant. Die Amplitude A übersteigt zu keiner Zeit t den Wert 1.

Filter weisen üblicherweise im Amplitudengang eine Periodizität von 2T auf. Beim Übergang einer Periode zur folgenden treten Störbereiche auf, also bei 2T, 4T, 6T .... Mit einem Parameter k der Interpolationsfunktion a(t), der Werte zwischen einschließlich $-1/2$ und $+1/2$ annehmen kann, können Dämpfung und Breite der Störbereiche eingestellt werden. Bei einem Wert von $k < 1$ ist die Dämpfung schwächer und das Filterverhalten breitbandiger, also von einem Wert von $k = 1$. In **Fig.** 1 ist der Parameter k der Interpolationsfunktion a(t) jeweils für einen Wert von k eingetragen, der $=1$, <1 oder >1 ist. Da die Interpolationsfunktion a(t) abschnittsweise definiert ist, lassen sich die einzelnen Abschnitte jeweils getrennt beschreiben. Im einzelnen gilt dabei:

$1/4 - k/8 + (2 - k)\, dT/4$, wenn für t gilt: $t_0 + 0 < t \leq t_0 + 1/2$
$1/2 + k \cdot dT/2$, wenn für t gilt: $t_0 + 1/2 < t \leq t_0 + 1$
$1/2 + k/4$, wenn für t gilt: $t_0 + 1 < t \leq t_0 + 1{,}5$
$1/2 - k \cdot dT/2$, wenn für t gilt: $t_0 + 1{,}5 < t \leq t_0 + 2$
$1/4 - k/8 - (2 - k)\, dT/4$, wenn für t gilt: $t_0 + 2 < t \leq t_0 + 2{,}5$.

Alle Zeitangaben beziehen sich auf eine beliebig definierte Zeiteinheit. Bei der obigen Beschreibung gibt t_0 ein Startzeitpunkt vor, der 1,25 Zeiteinheiten vor dem Zeitpunkt t_i des zu interpolierenden Signalwerts SW liegt. dT ist die zeitliche Verschiebung des zu interpolierenden Signalwertes SW zu seinem nächsten benachbarten vorgegebenen Stützwert.

Die Linie der Kurve der Interpolationsfunktion a(t) ist für den Parameter k = 1 durchgezogen, für den Parameter k < 1 mit langen Strichen gestrichelt und für k > 1 mit kleinen Strichen gestrichelt.

Bei der Darstellung nach **Fig.** 1 wurde $t_0 = 0$ gewählt. D.h. ein zu interpolierenden Signalwert SW würde beim Zeitpunkt $t_i = 1{,}25$ Zeiteinheiten liegen.

Mit Hilfe einer Sprungfunktion s(t – 1) läßt sich die Interpolationsfunktion a(t) auch in geschlossener Schreibweise angeben. Die Sprungfunktion s(t – 1) beschreibt einen Einheitssprung, der bis zum Zeitpunkt t = 1 den Wert 0 und ab diesem Zeitpunkt für alle folgenden Zeitpunkte den Wert 1 aufweist. Die Interpolationsfunktion a(t) lautet dann:

$a(t) = (t - kt/2) \cdot s(t) + (-2 + 3k) \cdot (-1 + 2t)/4 \cdot s(t - 1/2) + (k - k \cdot t) \cdot s(t - 1) + k \cdot (3/2 - t) \cdot s(t - 3/2) + ((-2 + 3 \cdot k) \cdot (-2 + t))/2 \cdot s(t - 2) - ((-2 + k) \cdot (5 + 2 \cdot t) /4 \cdot s(t - 2{,}5)$.

Wie bereits erläutert bestimmt der Parameter k, der Werte zwischen einschließlich –1/2 und +1/2 annehmen kann, die Breite und Dämpfung der ungeraden Störbereiche.

Wie kurz vorher erläutert, werden die vorgegebenen Stützwerte mit der Interpolationsfunktion a(t) gewichtet. Graphisch betrachtet muß die Interpolationsfunktion a(t) auf der Zeitachse so verschoben werden, daß eine gedachte Symmetrieachse der Interpolationsfunktion durch den Zeitpunkt t_i, zu dem der zu interpolierende Signalwert SW zu bestimmen ist, läuft. Aufgrund des angenähert trapezförmigen Verlauf der Kurve der Interpolationsfunktion a(t) steht jede gedachte Symmetrieachse senkrecht zur Zeitachse t. In **Fig.** 2 sind die Zeitpunkte t_{k-1}, t_k und t_{k+1} von Stützwerten n_{k-1}, n_k und n_{k+1} eingetragen. Der zu dem Zeitpunkt t_i des zu interpolierenden Signalwerts SW zeitlich nächst gelegene Stützwert ist n_k zu dem Zeitpunkt t_k. Der zeitliche Abstand zwischen diesen beiden Zeitpunkten wird als Verschiebung dT bezeichnet. Diese Verschiebung dT ist bei der abschnittsweisen Beschreibung der Interpolationsfunktion a(t) die Variable. Zu den Zeitpunkten der Stützwerte n_{k-1}, n_k und n_{k+1} werden die entsprechenden Werte der Interpolationsfunktion a(t) ermittelt. Beim Stützwert n_{k-1} erhält man den Wert $a(t_{k-1})$, beim Stützwert n_k den Wert $a(t_k)$ und beim Stützwert n_{k+1} den Wert $a(t_{k+1})$. Der zeitliche Abstand zwischen zwei unmittelbar aufeinander folgenden Stützwerten beträgt eine Zeiteinheit. Die Beträge dieser Stützwerte werden mit dem entsprechenden Wert a(t) multipliziert. Die Summe dieser drei Produkte gibt ein Betrag, der dem gesuchten Signalwert SW zu dem Zeitpunkt t_i entspricht. Es ist zu beachten, daß n_{k-1}, n_k und n_{k+1} jeweils eine Benennung des entsprechenden Stützwertes und nicht die jeweiligen Amplitudenwerte bezeichnen.

Das digitale Filter berechnet also zu einem beliebigen Zeitpunkt t_i aus Stützwerten, die zu diesem Zeitpunkt benachbart liegen, den Signalwert SW und gibt diesen aus.

Fig. 3 zeigt eine bevorzugte Kombination von Filteranordnungen unter Verwendung des erfindungsgemäßen digitalen Filters, daß hier mit F2 bezeichnet ist. Signale werden mit einer Frequenz f_{IN} abgetastet und einem linearphasigen Interpolationsfilter F1 zugeführt. Dort wird die Abtastrate verdoppelt, d. h. zu jedem ursprünglichen Abtastwert wird durch Interpolation ein Zwischenwert erzeugt. Die ursprünglichen Abtastwerte und die im Interpolationsfilter berechneten Zwischenwerte werden an das digitale Filter F2 weitergegeben. Dort kann die Abtastrate um ein beliebiges Verhältnis verändert werden. Die so ermittelten Signalwerte werden von einem Dezimationsfilter F3 gefiltert, um eine Bandbegrenzung zu erzielen. Dies ist dann notwendig, wenn die Abtastrate der Signalwerte größer ist als die Abtastrate f_{IN}. An einem Ausgang des Dezimationsfilters F3 stehen die ermittelten Werte mit der Abtastfrequenz f_{OUT} zur weiteren Signalverarbeitung zur Verfügung.

Fig. 4 zeigt ein Ausführungsbeispiel für das linearphasige Interpolationsfilter. Es handelt sich dabei um ein Filter 5. Ordnung mit 5 Verzögerungsgliedern z^{-1}. Ein Eingangssignal x durchläuft eine bestimmte Anzahl von Verzögerungsgliedern bevor es mit sich selbst um eine bestimmte Zeit verzögert addiert wird. Die Summe der Verzögerungen der beiden Summanden entspricht stets 5 Verzögerungsgliedern z^{-1}. Auf diese Weise erhält man 3 Zwischenwerte, die mit Faktoren a, b und c multipliziert werden. Aus der Summe dieser Produkte erhält man einen Ausgangswert Y1, der dem zuvor genannten Zwischenwert entspricht. Durch eine bloße Verzögerung des Eingangswertes X bekommt man einen weiteren Ausgangswert Y2. Die Verzögerung des weiteren Ausgangswertes Y2 gegenüber dem Eingangswert X ist erforderlich, da der Ausgangswert Y1 durch die Interpolation einer zeitlichen Verzögerung unterliegt und die zeitliche Reihenfolge des Zwischenwerte zu den ursprünglichen Werten eingehalten werden muß.

Das linearphasige Interpolationsfilter F1 nach **Fig.** 4 läßt sich beschreiben durch:

$$H(Z) = a - b \cdot Z^{-1} + c \cdot Z^{-2} + c \cdot Z^{-3} - b \cdot Z^{-4} + a \cdot Z^{-5}.$$

Um eine gute Anpassung an das nachgeschaltete digitale Filter F2 zu erreichen, gelten für die Faktoren a, b und c folgende Bedingungen:
$0 \leq a \leq 1/4$
$0 \leq b \leq 1/2$
$c = 1/2 + b - a$.

Eine besonders gute Anpassung erhält man bei der Wahl von:
a = 1/32, b = 5/32 und c = 5/a.

Gute Ergebnisse erzielt man auch mit:
a = 1/32, b = 9/64 und c = 39/64.

Selbstverständlich können auch linearphasige Interpolationsfilter höhere Ordnung mit dem digitalen Filter F2 kombiniert werden.

Patentansprüche

1. Digitales Filter zur zeitlichen Interpolation diskreter Signale, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Filter einen zu interpolierenden Signalwert (SW) als Summe aus mit jeweils einem Faktor (a(t)) gewichteten vorgegebenen Stützwerten (n_{k-1}, n_k, n_{k+1}) berechnet, die zu dem Signalwert (SW) benachbart sind, wobei jeder Faktor (a(t)) durch eine Interpolationsfunktion der Zeit, die über die Zeit abschnittsweise linear definiert ist, zu einem Zeitpunkt (t_{k-1}, t_k, t_{k+1}) des entsprechenden Stützwertes (n_{k-1}, n_k, n_{n+1}) bestimmt ist.

2. Digitales Filter nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Interpolationsfunktion jeweils in einem Zeitabschnitt (b1, b2, ... b5) linear mit konstanter Steigung ist, der halb so lang ist wie der zeitliche Abstand zwischen zwei unmittelbar aufeinander folgenden Stützwerten (n_k, n_{k+1}).

3. Digitales Filter nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Interpolationsfunktion auf der Zeitachse (t) bezüglich des Zeitpunktes (t_i) des zu interpolierenden Signalwertes (SW) symmetrisch ist.

4. Digitales Filter nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Interpolationsfunktion ein Zeitintervall (B3) mit einem konstanten Funktionswert aufweist.

5. Digitales Filter nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Interpolationsfunktion beschreibbar ist durch:

$$a(t) = (t - kt/2) \cdot s(t) + (-2 + 3k) \cdot (-1 + 2t)/4 \cdot s(t - 1/2) + (k - k \cdot t) \cdot s(t - 1) + k \cdot (3/2 - t) \cdot s(t - 3/2) + ((-2 + 3 \cdot k) \cdot (-2 + t))/2 \cdot s(t - 2) - ((-2 + k) \cdot (5 + 2 \cdot t))/4 \cdot s(t - 2{,}5),$$

wobei a(t) der Funktionswert zu einem Zeitpunkt t ist und 1,25 Zeiteinheiten vor den Zeitpunkt des Signalwertes (SW) gilt: $t = 0$,
k ein von der Zeit unabhängiger Parameter ist und
$s(t - 1)$ ein Einheitssprung ist, der bis zum Zeitpunkt $t = i$ den Wert 0 und ab diesem Zeitpunkt den Wert 1 aufweist.

6. Digitales Filter nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Interpolationsfunktion zu Zeitpunkten t beschreibbar ist durch:
$1/4 - k/8 + (2 - k)\,dT/4$, wenn für t gilt: $t_0 + 0 < t \le t_0 + 1/2$
$1/2 + k \cdot dT/2$, wenn für t gilt: $t_0 + 1/2 < t \le t_0 + 1$
$1/2 + k/4$, wenn für t gilt: $t_0 + 1 < t \le t_0 + 1{,}5$
$1/2 - k \cdot dT/2$, wenn für t gilt: $t_0 + 1{,}5 < t \le t_0 + 2$
$1/4 - k/8 - (2 - k)\,dT/4$, wenn für t gilt: $t_0 + 2 < t \le t_0 + 2{,}5$,
wobei der zeitliche Abstand zwischen zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden vorgegebenen Stützwerten (n_k, n_{k+1}) eine Zeiteinheit beträgt,
t_0 ein Startzeitpunkt ist, der 1,25 Zeiteinheiten vor dem Zeitpunkt (t_i) des zu interpolierenden Signalwertes (SW) liegt und
dT die zeitliche Verschiebung des zu interpolierenden Signalwertes (SW) zu seinem nächsten benachbarten vorgegebenen Stützwert (n_k) darstellt.

7. Digitales Filter nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß ein linearphasiges Interpolationsfilter (F1) einen Teil der vorgegeben Stützwerte (n_k) liefert.

8. Digitales Filter nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Übertragungsfunktion des Interpolationsfilters (F1) beschreibbar ist durch:

$$H(Z) = a - b \cdot Z^{-1} + c \cdot Z^{-2} + c \cdot Z^{-3} - b \cdot Z^{-4} + a \cdot Z^{-5},$$

wobei a, b und c Konstanten sind.

9. Digitales Filter nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß für die Konstanten gilt:
$0 \le a \le 1/4$
$0 \le b \le 1/2$
$c = 1/2 + b - a$.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

Nummer: DE 198 42 421 A1
Int. Cl.[6]: H 03 H 17/02
Offenlegungstag: 23. Dezember 1999

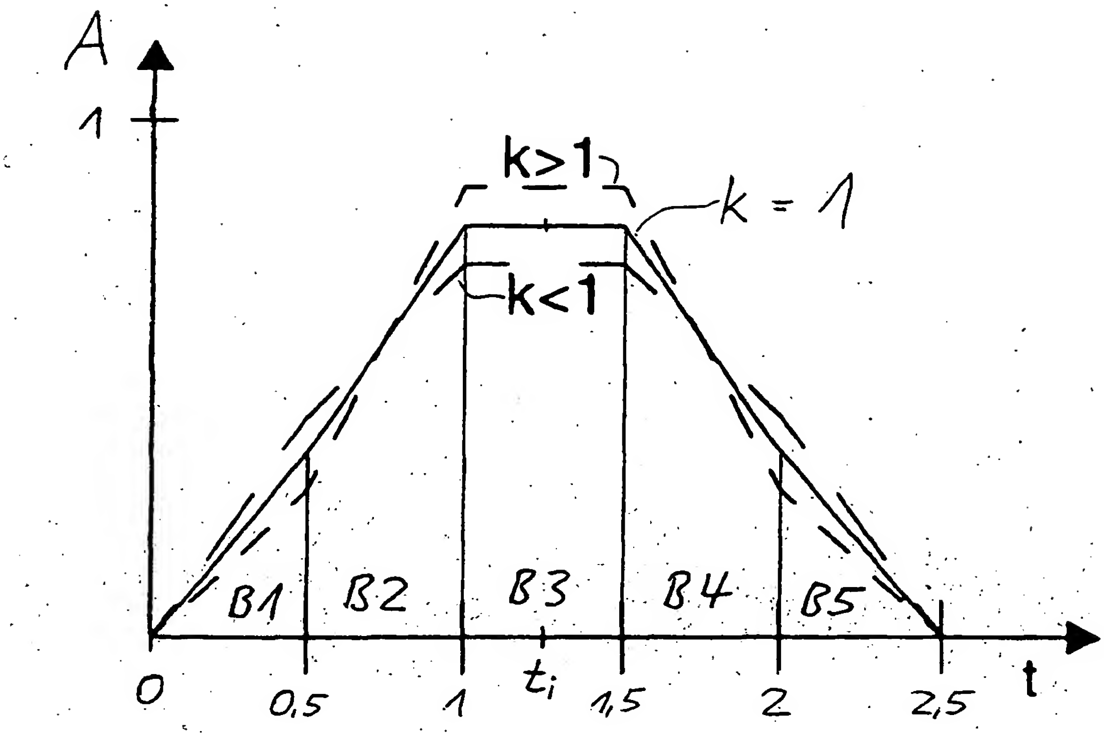


FIG 1

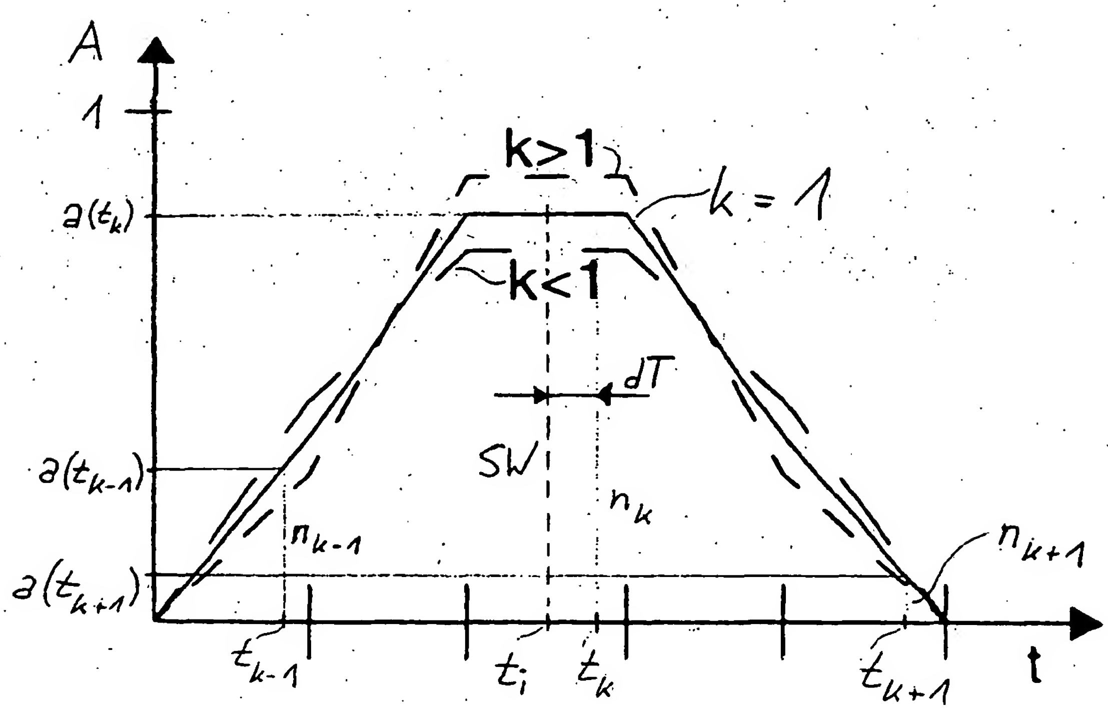


FIG 2

Nummer: DE 198 42 421 A1
Int. Cl.[6]: H 03 H 17/02
Offenlegungstag: 23. Dezember 1999

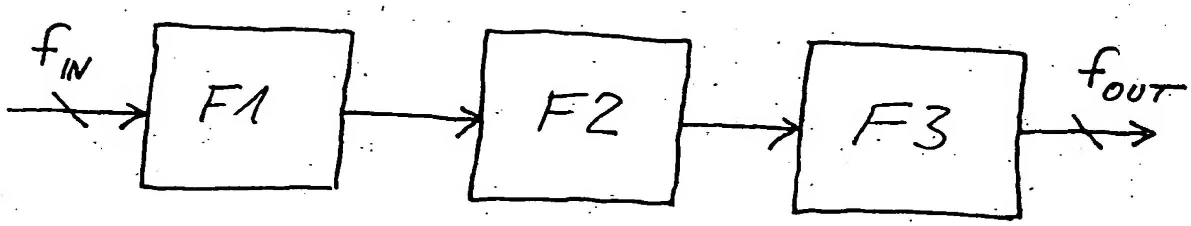


FIG 3

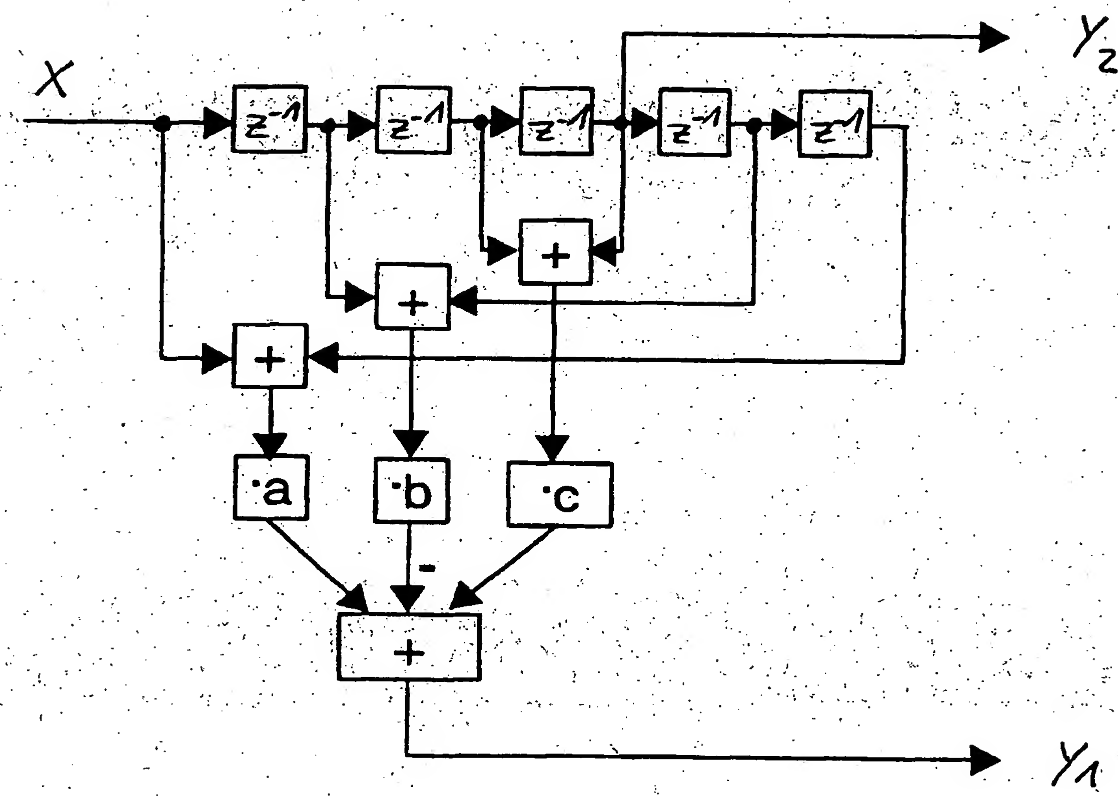


FIG 4